氣候變遷下水稻生長及產量之衝擊評估

姚銘輝*、陳守泓
行政院農委會農業試驗所農業工程組

摘要

氣候變遷為影響農作物生長及產量的重要因素之一，本研究即以 The Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT)作物模式評估氣候變遷對水稻生長及產量的衝擊，並利用氣候敏感度分析探討氣候因素對水稻產量的影響程度。又結合大氣環流模式及地理資訊系統，以預測在未來氣候及不同氣候情境下，臺灣水稻產量的變化趨勢。結果顯示，由水稻生長特性實測資料之驗證，發現 DSSAT 模式可適用於臺灣氣候，實測資料和 DSSAT 模擬值有極佳相關性；其中，生質量之相關係數皆可達 0.9，產量約為 0.7-0.8 之間。增溫將使水稻生育日數縮短，影響水稻榖粒充實而減產。日射量直接影響水稻生質量累積，與比葉面積成反比。大氣二氧化碳濃度升高使水稻葉片輻射利用效率提高，且因氣孔導度下降而減少蒸發散量。至於氣候變遷下臺灣水稻產量之空間分布，北部種植之水稻有明顯減產現象，中南部則有些微增產，惟臺灣全區之平均值則仍然呈現減產趨勢，預估於 2020 年、2050 年及 2080 年分別減產 3.5%、4.7%及 7%。

關鍵詞： 氣候變遷、水稻、大氣環流模式、作物模式、地理資訊系統。

The Impact Evaluation of Climate Change on the Growth and Yield of Rice

Ming-Hwi Yao* and Shou-Hung Chen

Agricultural Engineering Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Wufeng, Taichung Hsien 41362, Taiwan ROC

ABSTRACT

Climate change is one of the primary determining factors on the growth and yield of a crop. In this study, the Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) software package was used to assess the impact of climate change on the growth and yield of rice in Taiwan. The climate sensitivity analysis was also used to evaluate the effects of climate factors on rice yield. Incorporating with the general circulation model (GCM) and geographic information system (GIS), future climate status and rice yield under different climate scenarios were predicted. Result indicated that DSSAT model was suitable for Taiwan climate analyses using the measured data of rice growth characteristics. The measured and predicted values had a good relationship; for example, the correlation coefficients were greater than 0.9 for biomass and was in rage 0.7–0.8 for yield. Results further showed that the increasing temperature would decrease the growth days that caused the reduction of rice yield due to the insufficient grain filling. Solar radiation affected the biomass accumulation, and negatively correlated with specific leaf area. The elevated CO_2 concentration improved the radiation use efficiency of rice leaves and decreased the evapotranspiration rate with the closure of stomata aperture. The results of spatial distribution of rice yield revealed that, under climate change in the future, yield will significantly lose in the northern region while slightly increase in the southern part. However, the average yield of rice cultivated in Taiwan will be reduced by 3.5%, 4.7% and 7.0% in 2020, 2050 and 2080, respectively.

* 通信作者, mhyao@ tari.gov.tw
投稿日期：2009 年 8 月 25 日
接受日期：2009 年 9 月 7 日
作物、環境與生物資訊 6:141-156 (2009)
Crop, Environment & Bioinformatics 6:141-156 (2009)
189 Chung-Cheng Rd., Wufeng, Taichung Hsien 41362, Taiwan ROC

Key words: Climate Change, Rice, General circulation model, Crop model, Geographic information system.

前言

對於未來氣候演進的評估，雖然氣候本身具有很高的變異性，使得預測上存在極大不確定性，但目前的科學界對於二氧化碳濃度(CO_2)及氣溫的持續增加則具有共識，差別僅在上升速率的估算幅度。依據預測在 21 世紀結束前，如果未積極有效的減緩溫室氣體排放，全球平均溫度將升高 1.4–5.8℃，而 CO_2 濃度將達到 478–1,099 ppm (IPCC 2001)。對農業生產而言，雖然作物有所謂『CO_2 肥料效應』，也就是提高大氣 CO_2 濃度有助於葉片光合作用之進行，使作物生質量累積增加，但大氣 CO_2 濃度增加所帶來增溫現象卻縮短作物生育期，可能造成穀粒充實不足而減產。因此，氣候變遷對於未來農作物產量究竟係促進或降低，必須深入探討、釐清，因為這將攸關人類賴以生存之糧食供應問題。

農耕過程中氣象環境和作物之間的交感相當複雜，有些關係是以假設性為前提，同時亦非線性反應。又作物生長在不同時間及空間的反應與表現有別，因此針對農業政策、栽培技術及環境因素之評估常需藉助於作物模式。作物模式以數學方式描述作物生長情形，且常利用電腦作為輔助工具。目前具有氣候評估能力之作物模式甚多，包括 DSSAT (Jones *et al.* 2003)、CENTURY (Parton 1996)、Oryza2000 (Bannayan *et al.* 2005)、EPIC (Tan and Shibasaki 2003)和 DNDC (Li 2000)等。其中 DSSAT 模式是由 CERES 模式系列所發展出來，廣泛運用於水稻栽培國家以評估氣候變遷衝擊 (Tsvetsinskaya *et al.* 2003, Mall and Aggarwal 2002)。目前此模式之預測結果，已被政府間氣候變遷委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change；IPCC)所接受。

氣候(象)因素與作物生長發育息息相關，通常以氣溫、日射量和降雨等三項因子最廣為探討。氣溫是調節營養生長速率及發育階段之主要氣象變數，同時也影響作物呼吸率及蒸發散量。太陽輻射提供葉片光合作用所需能量，左右植株碳水化合物分配和生質量累積。降雨雖未直接影響作物生育，但因水分乃作物生長要素，降雨不足造成的乾旱或過多形成的水患亦將控制生育表現。此外，文獻顯示氣象因子間之比值對評估作物生長更具深層意義；例如，輻射利用效率(radiation-use efficiency；RUE)係累積生質量(biomass)與葉片截取日射量間之比值(Manderscheid *et al.* 2003)，涵蓋了日射量所發展出作物模式之重要參數，包括整合作物發育、型態、生理和生化反應等。因此，輻射利用效率常作為評估不同期作及氣候條件下作物生長及產量限制的指標(Sinclair and Muchow 1999)，此一指標與種子產量、收穫指數(harvest index)皆有高相關性(Tesfaya *et al.* 2006)。

臺灣地處亞熱帶，地形及氣候在空間分佈上差異甚大，評估農作物生產受氣候變遷衝擊之影響以模式較為可行。水稻是我國最主要糧食作物，水稻產量也是農業生產及糧食安全重要指標。本研究室曾進行水稻在氣候變遷衝擊下生產影響評估之研究(Yao *et al.* 2000)，但近十年來國際上針對未來氣候之預測能力已有大幅度進展，同時作物模式也隨著對作物生理的瞭解而不斷的版本升級，對於作物生長及產量具有更佳的描述及預測功能。由於作物模式需要模擬區域之農耕特性資料，包括氣候、土壤理化性質、水分管理及耕作方式等(Jones *et al.* 2003)，因此本研究利用農委會農業試驗所16年水稻豐歉試驗資料為模式驗證資料庫，以 DSSAT 模式來評估氣候變遷對水稻生產之影響，尤其偏重於不同氣象因素對於水稻生產的效應。另以大氣環流模式(general circulation model; GCM)之未來氣候預測值代入 DSSAT 模式內，再結

合作物模式與地理資訊系統(geographic information system; GIS)，延伸空間尺度的評估。此種研究模式可運用於農業管理決策及栽培曆規劃，復可作為未來作物適栽區及糧食供給安全性等之評估用途。

材料與方法

一、水稻生育資料調查

水稻生育資料取自於農委會農業試驗所(東經 120°，北緯 24°，海拔高度 85 公尺)進行之水稻豐歉試驗，自 1993 年一期作至 2008 年二期作止共 16 年，合計 32 個期作資料。參試品種為稉稻臺農 67 號及秈稻臺中秈 10 號二品種。生育資料是由插秧後三週開始調查，包括每週調查葉乾重、桿乾重、穗重、葉面積，並於成熟期調查產量及產量構成要素。又計算比葉面積(specific leaf area; SLA)，以葉面積與葉乾重之比值表示($cm^2\ g^{-1}$)，比較其與日射量之關係。由於試驗目的在探討氣象和產量間的關係，因此水稻試區是在固定田區，由專人負責作一致的管理，並適度控制病蟲害發生，盡量排除非氣象的影響因子。

二、DSSAT 模式基本資料

本研究所用作物模式為 DSSAT Ver 4.0。DSSAT 氣象資料輸入值為每日之日射量、最高溫度、最低溫度及降雨量，本研究採用農委會農業試驗所之一級農業氣象測站之測值，該測站距離水稻試區約 500 m。水稻栽培方式依照目前慣行方式進行，行株距 0.15 m × 0.30 m，單位面積株數為 22 hills m^{-2}，模擬以單一期作為主，不考慮前期作的影響。土壤特性是依據農委會農業試驗所農場之土壤調查資料，選取粘質壤土為水稻田土壤質地，施用氮肥量為 113 kg N ha^{-1}，模擬過程中設定為無肥料逆境。DSSAT 模式對作物產量模擬有多次改版，更新版(4.02 版)除加入新作物外，也改變作物模式模擬架構及增加新生長參數。過去曾利用 DSSAT 3.0 版建立臺農 67 號及臺中秈 10 號兩品種之遺傳參數(Yao *et al.* 2000)，由於新版仍沿用舊版之評估方式，因此本研究仍採用已建立之稻種遺傳參數。

三、模式參數測定及敏感度分析

敏感度分析是將某一參數提高或降低輸入值，而在其他參數固定情形下，檢測輸入值對模式輸出值的影響程度，並可透過參數的調整而瞭解對產量的貢獻度。DSSAT 為綜合性模式，其所需參數甚多，包括耕地土壤特性(質地、酸鹼度、離子含量及有機質含量等)、作物特性(遺傳特性及生理特性)及氣象資料。本研究主要著重於氣象因子之敏感度分析，包括溫度、日射量及 CO_2 濃度，至於雨量對於水稻種植區而言，並非限制因子，本研究不予討論，因此 DSSAT 模式中以無水分逆境作設定。敏感度分析之溫度及 CO_2 濃度以固定數值方式進行，即增減某一數值而進行敏感度分析，溫度由對照組(1993-2008 年平均值)分別加減至 5℃，以每 0.5℃為等級；CO_2 濃度則由 400 ppm 以每 100 ppm 為等級增加至 1,000 ppm。日射量之變異係數較大，因此以固定倍數方式進行，由對照組分別加減至 50 %，以每 10 %為等級。至於其他參數若有實測值則輸入模式內，若無實測資料則以推估方式進行。水稻之輻射利用效率(radiation use efficiency; RUE)計算，係以每公頃稻株生質量和生育期間累積日射量之比值表示(g MJ^{-1})，較大數值表示較高之輻射利用效率。

四、統計分析

水稻生長性狀迴歸參數的檢測是利用均值相關統計方法，包括均值偏差(mean bias error; MBE)及均值平均根偏差(root mean square error; RMSE)兩種方式。

$$MBE=[\Sigma(Fi\ comp - Fi\ meas)]/n \quad (6)$$

$$RMSE=\{[\Sigma(Fi\ comp - Fi\ meas)^2]/n\}^{1/2} \quad (7)$$

Fi comp 指第 i 筆估計值，Fi meas 指第 i 筆實測值，n 為所有測定值數目。RMSE

值低表示估算正確率高；MBE 值若為正則為高估，為負則為低估。

五、氣象測站資料

我國氣象觀測網能提供 DSSAT 作物模式所需氣象資料之測站共 40 站(如 Fig. 1)，各測站均為中央氣象局所屬氣象站，資料年份取自 1996 年至 2005 年共十年的資料，進行 DSSAT 模式預測結果之資料平面化工作，而為使測站在空間分佈上具有代表性，少數測站之日射量缺值部分，則由日照時數及溫度差所建立之迴歸方程式推估(Chen *et al.* 1994, Yao *et al.* 2002)。

六、氣候變遷情境模擬

本研究所用氣候變遷未來情境預測之氣象資料，自 IPCC 網站資料庫下載(http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk)，包括七種大氣環流模式(General Circulation Model; GCM)之預測結果。大氣環流模式是將全球依據經緯度範圍畫出格網，由大氣原理以數值分析方式計算每一格點的氣候值，氣候情境是以假設排放 1%溫室氣體為條件，模擬 2020 年、2050 年及 2080 年之情境，其中 CO_2 濃度於 2020 年、2050 年及 2080 年分別假設為 451 ppm、608 ppm 及 820 ppm。其次，因為 DSSAT 模式所需氣象資料包括最高溫度、最低溫度、日射量及降雨量，故僅有 CGCM1、CSIRO、ECHAM4 及 HadCM2 等四種模式適用，於是選用此四種模式接近臺灣之格網氣候預測值資料(Fig. 2)。首先利用地理統計之反距離加權差值法(inverse distance to a power)，內插臺灣 40 個氣象測站之內插值。而由於 GCM 預測值為月之溫度差值，乃將該差值代入 1996 年至 2005 年之溫度資料，假設每日之變化量與月變化相一致，將經過修改後之資料視為未來氣溫模

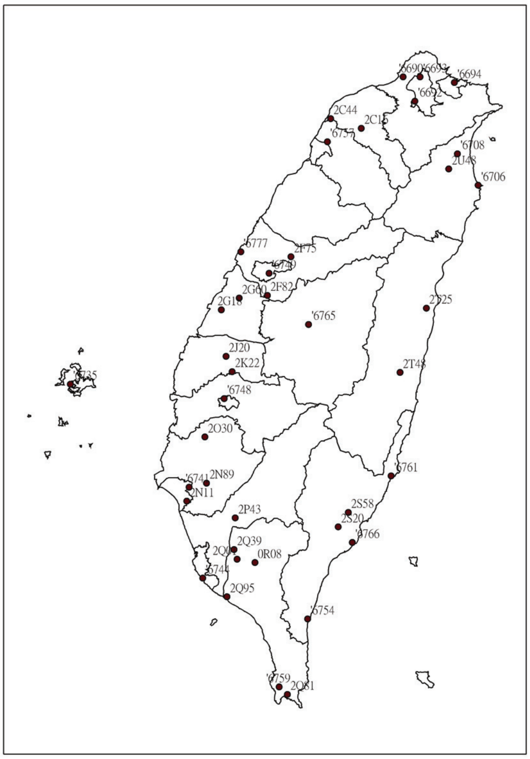

Fig. 1. The spatial distribution of weather stations in Taiwan used in this study.

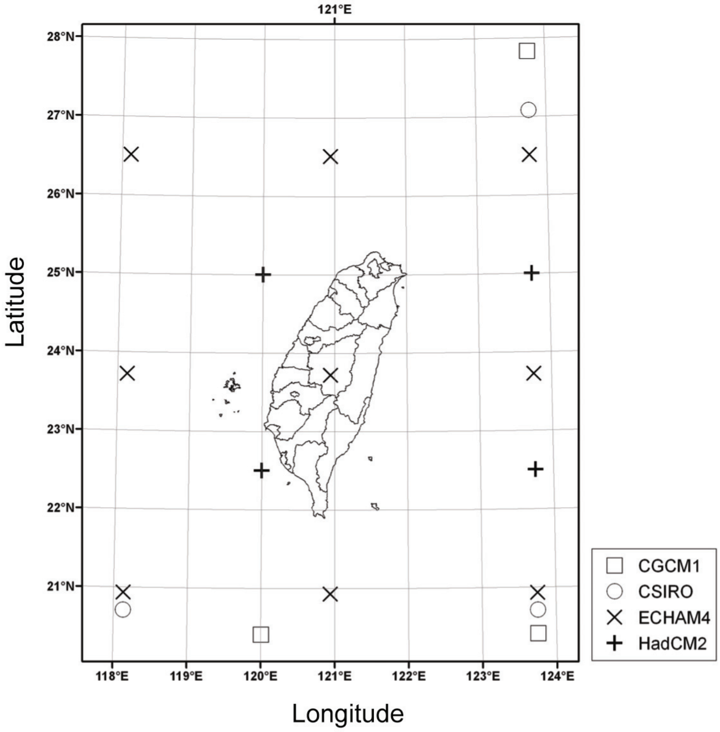

Fig. 2. Position of the GCM grid points lying within or close to the Taiwan. The symbols related to the four GCMs coincide with the center of the grid boxes.

擬值。本研究在氣候敏感度分析雖有考慮日射量的變化，但 GCM 模式日射量預測模式並不多，同時變異性極大，因此在未來氣候模擬僅以溫度及二氧化碳濃度為主。

結果

農委會農業試驗所水稻豐歉試驗之試區，1993-2008 年(16 年)期間皆以一、二期水稻及冬季種植綠肥作物之栽培方式進行，水稻生育過程盡量維持無其他生長逆境，以探討作物生長及氣象環境之關係。水稻生育期間氣象參數及產量之分析如 Table 1 所示，氣象資料依據 DSSAT 模式所需項目輸入，包括日最高溫、日最低溫、日射量及雨量等，其中溫度為平均值，日射量及雨量為累積值。以變異係數(coefficient of variation；CV)比較不同參數間變異量，由表可見無論最高溫或最低溫之變異量皆不大，CV 值介於 2-3% 之間。累積日射量一期作較二期作為高，主要係一期作生育日數較長導致，而年際間之 CV 值約為 8%，以二期作高於一期作，推測乃因生育期間累積日射量受大氣雲量及降雨日數影響。降雨量雖非水稻栽培直接影響因素，但降雨影響日射量及溫度變化，且其 CV 值極高。水稻產量受許多因素影響，基於 Table 1 所列氣象因子之變異量大小，似以日射量影響較大。至於品種間產量之變異量，臺農 67 號低於臺中秈 10 號(相差約 3%)，顯示臺農 67 號較適合霧峰地區之氣象環境。

田間實測值和 DSSAT 模擬值之差異比較分列於 Table 2，包括開花日數、成熟日數及累積生質量等三項描述水稻生長的參數。水稻生育期轉換受遺傳參數影響，開花期及成熟期可由植株外觀形態直接觀察及記錄，實測資料和 DSSAT 模擬值有極佳相關性，相關係數皆可達 0.9 以上。在開花日數方面，兩

Table 1. Mean and coefficient of variation (C.V) of the agro-meteorological factors and grain yield for two rice cultivars grown in the period of 1993-2008.

Crop season	Maxi. Temp. (℃)	Min. Temp. (℃)	Solar radiation (MJ)	Precipitation (mm)	Yield of Tainung 67 ($kg\ ha^{-1}$)	Yield of Taichung Sen 10 ($kg\ ha^{-1}$)
1st crop						
mean	27.63	19.11	1332.54	730.56	5394.28	4521.66
C.V	2.76	2.32	7.86	47.35	9.71	12.15
2nd crop						
mean	31.49	22.51	1219.20	420.43	3890.16	3469.78
C.V	2.73	3.96	8.04	56.09	11.84	14.71

Table 2. Summary of statistics for validation of DSSAT on growth traits of rice grown at the experimental farm of Taiwan Agricultural Research Institute during the period of 1993-2008.

Cultivar	Statistics	Anthesis (DAP[x])		Maturity (DAP)		Biomass ($kg\ ha^{-1}$)	
		Obs.	Pred.	Obs.	Pred.	Obs.	Pred.
Tainung 67							
1st crop	Mean	91.8±5.9	91.8±5.7	123.0±5.4	123.4±5.2	9438.3±818.9	9189.8±869.0
	R^2	0.98**		0.98**		0.90**	
	MBE	0.0		-0.0		-248.5	
	RMSE	0.9		1.0		439.9	
2nd crop	Mean	65.8±1.8	65.4±1.6	100.0±4.3	100.8±3.8	7394.7±961.0	6906.2±899.0
	R^2	0.92**		0.96**		0.95**	
	MBE	0.4		0.7		-488.5	
	RMSE	0.8		1.3		607.0	
Taichung Sen 10							
1st crop	Mean	86.4±4.2	87.6±6.0	114.4±.5.5	114.5±4.8	8461.0±736.3	8173.8±858.7
	R^2	0.94**		0.95**		0.85*	
	MBE	1.3		-0.4		-287.2	
	RMSE	2.8		1.8		522.0	
2nd crop	Mean	62.0±1.7	61.1±1.4	90.4±3.4	90.8±3.5	6217.7±871.7	5999.9±938.4
	R^2	0.91**		0.97**		0.90**	
	MBE	0.9		-0.4		-217.8	
	RMSE	1.1		0.9		457.9	

[x] DAP: days after planting; *, ** significant at the 0.05 and 0.01 probability levels according to the analysis of two-tailed test.

個品種在二期作相關係數較一期作低，成熟日數則除了臺農 67 號之二期作數字似有高估情形之外(MBE = 0.69)，其餘則為低估(MBE <0)，而預測準確性(RMSE)則以臺中秈 10 號一期作較差。在生質量方面，兩品種兩期作 DSSAT 模擬結果之相關係數約為 0.9，但模式模擬有明顯低估現象(MBE < 0)，每公頃低估約 200-500 kg。由於生質量同時受到環境及植體本身狀態影響，包括光合作用速率、分蘗數、葉片數、株高、器官含氮量…等皆為直接影響因素，目前尚無完整實測值可作驗證或解釋低估原因。而產量預測方面，DSSAT 模擬產量與 16 年實測值相較結果如 Fig. 3，臺農 67 號一、二期作相關係數為 0.74 與 0.72，臺中秈 10 號則為 0.80 與 0.83。

氣候敏感度分析主要在瞭解不同氣候條

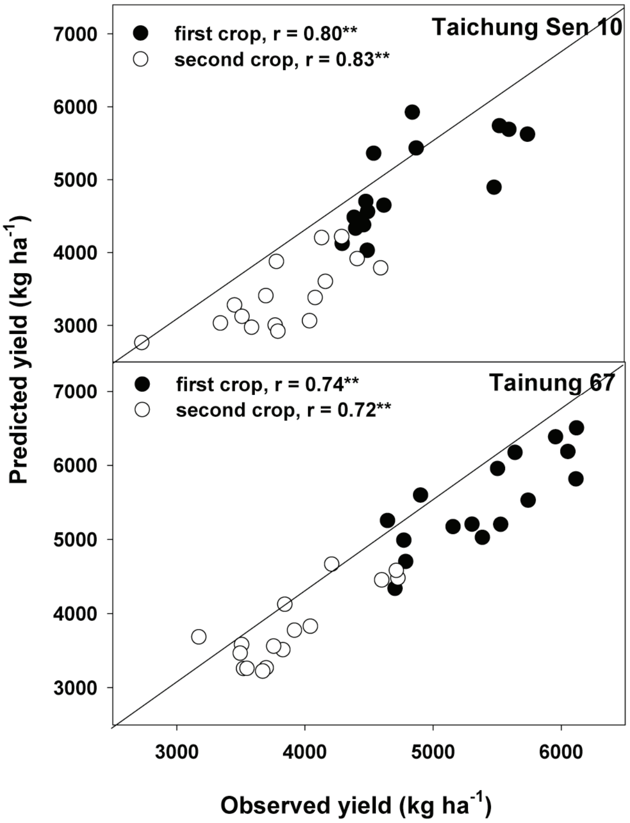

Fig. 3. Evaluation of the rice yields simulated by the DSSAT model. The fit between the observed and predicted yields is expressed in terms of the 1:1 line.

件對於水稻生長之影響，本研究以臺農 67 號為例，將氣候資料調整後由 DSSAT 模擬 16 年 32 期作之平均值。由 Table 1 發現 16 年期間水稻試區一期作平均最高溫及最低溫分別為 27.6 及 19.1℃，二期作則為 31.5 及 22.5℃。溫度敏感度分析係將最高溫及最低溫同時加減特定溫度後分析，以加減 5℃為範圍之分析結果如 Fig. 4 所示。其中一期稻作在降溫 5℃時，成熟日數需 168 天，但因生育日數較長，產量可高達 7,467 kg，之後隨著溫度上升則成熟日數及產量皆明顯下降。二期稻作雖成熟日數隨增溫縮短，但產量反而在降溫 3℃較高，雖然現在溫度增溫後對於成熟日數影響不大(增溫 5℃僅縮短 18 天)，但對於產量的影響仍非常明顯，其原因可能應包括高溫對水稻生長的影響，而不僅限於成熟日數的縮短。一般而言，水稻生育階段轉換受累積溫度影響，溫度升高雖可縮短生育日數，卻易導致穀粒充實不足而減產。

日射量對水稻平均比葉面積(SLA)及生質量累積之敏感度分析結果繪於 Fig. 5，通常日射量值越高，生質量累積越多。若以目前日射量累積值為基準(一期作 1,332 W m^{-2} ；二期作 1,219 W m^{-2})，則增加的部分在兩期作幅度皆相近，而在較低日射量下，一期稻作增加幅度大於二期稻作。葉片生質量乃固碳作用結果，其累積受到作物葉片影響，尤其葉面積決定了受光面積及輻射能截取能力，因此高 SLA 代表高生質量生成效率。由 Fig. 5 顯示，SLA 亦受到日射量變化影響，一期作呈線性下降，即日射

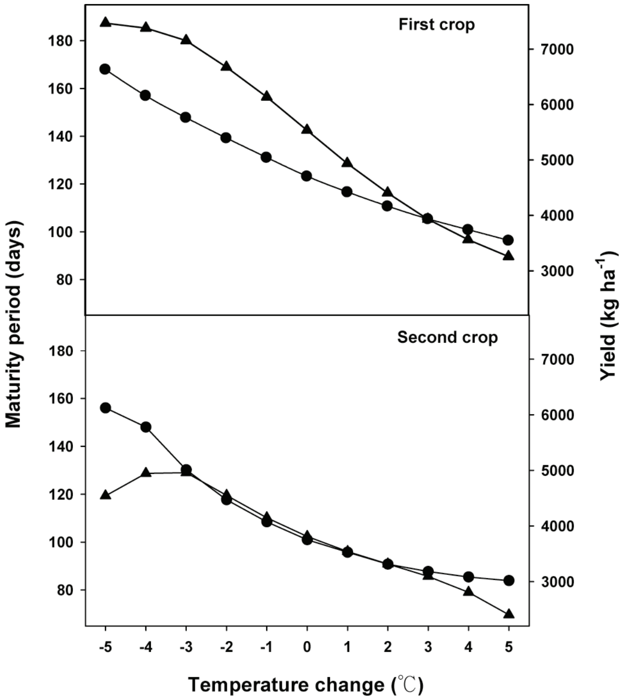

Fig. 4. Evaluation of the effects of changing temperature on maturity period (●) and yield (▲) in rice using the DSSAT model.

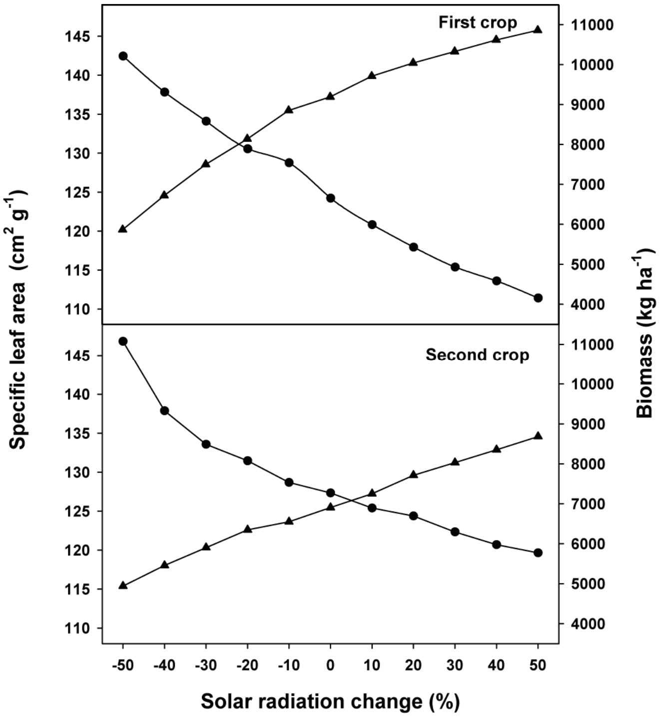

Fig. 5. Evaluation of the effects of changing solar radiation on specific leaf area (●) and biomass (▲) in rice using the DSSAT model.

量越高則葉片生質量累積越多；而在二期作增加日射量對於 SLA 影響不大，說明現行二期作之日射量已近於光飽和點，對於葉面積或葉乾重累積影響程度不高。

CO_2 濃度對水稻輻射利用效率(RUE)及蒸發散量之敏感度分析結果列於 Fig. 6，在大氣 CO_2 濃度增加時，葉片之固碳作用能力也將增加，因此對日射量的利用效率會隨著 CO_2 濃度呈線性增加。期作間之差異比較，發現一期作在 CO_2 濃度增至 1,000 ppm 時 RUE 可達 8.5 g MJ^{-1}，而二期作之 RUE 則為 7.5 g MJ^{-1}。雖然不同 CO_2 濃度對於兩期作之 RUE 有不等之影響，但增加幅度卻相近，在 RUE 介於 400 至 1,000 ppm 之變化量皆為 2.3 g MJ^{-1}，顯示水稻生質量累積會受到日射量及 CO_2 濃度的直接影響。另由作物生理現象，葉片氣孔受到高 CO_2 濃度刺激會有關閉作用，因此在高 CO_2 濃度下雖然進入氣孔內腔的 CO_2 通量(flux)較高，氣孔開度反而較小關閉，其結果使得稻株蒸發散量下降(Fig. 6)。當 CO_2 濃度由 400 ppm 增加至 1,000 ppm 時，蒸發散量在一期作下降 13%，二期作則下降 14%。

針對未來氣候情境下水稻產量之改變，本試驗乃進行溫度、日射量及 CO_2 濃度對水稻生長性狀之敏感性分析，結果如 Figs. 4-6，而三種氣象因子之不同組合分析結果則列於 Table 3。比較兩品種 16 年之平均生質量及產量，以及最佳與最差組合之變化範圍，發現在最佳組合條件(指溫度下降 5℃、日射量增加 50%及 CO_2 濃度 1000 ppm)下，生質量及產量增加 40-60%，在最差組合條件

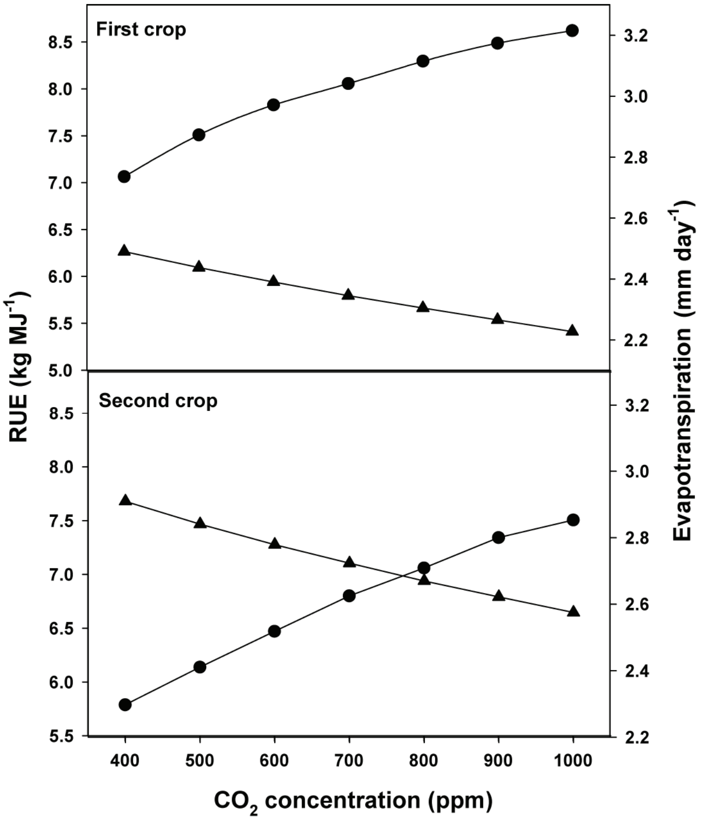

Fig. 6. Evaluation of the effect of changing CO_2 concentration on radiation use efficiency (RUE) (●) and evapotranspiration (▲) in rice using the DSSAT model.

Table 3. The sensitivity analysis of climatic factors on biomass and yield at two rice cultivars, Taichung Sen 10 and Tainung 67.

	Taichung Sen 10			Tainung 67		
	Current	Pessimistic	Optimistic	Current	Pessimistic	Optimistic
Biomass (kg ha^{-1})						
1st crop	8,461	2,344	12,040	9,438	2,732	13,192
2nd crop	6,218	1,389	9,557	7,395	1,708	11,329
Yield (kg ha^{-1})						
1st crop	4,522	1,290	7,190	5,394	1,580	7,977
2nd crop	3,470	526	5,427	3,890	873	6,111

(指溫度上升 5℃、日射量下降 50%及 CO_2 濃度 400 ppm)下，生質量及產量減少 70-80%。顯示在本文研究之敏感度分析設定範圍，水稻減產幅度大於增產幅度。

臺灣全地之平緩地區皆可種植水稻，但因各地氣候條件不盡相同，稻作生產量並不一致。於是進行不同區域之溫度及 CO_2 濃度對水稻產量影響敏感度分析，結果如 Fig. 7。其中，增溫會縮短生育日數使產量明顯下降，尤以北部地區為然，而提高 CO_2 濃度則促進水稻增產，尤以南部區域較為明顯。至於不同溫度及 CO_2 之組合，以 40 個模擬點之水稻產量平均值來看，在 2℃及 600 ppm CO_2 組合下，平均產量為 6,654 kg ha^{-1}，略高於對照組(0℃及 360 ppm CO_2)之 6,394 kg ha^{-1}；在 4℃及 800 ppm CO_2 組合下，平均產量略低於對照組，在 6℃及 1,000 ppm CO_2 組合下，各地產量皆明顯下降，平均產量為 6,043 公斤公頃$^{-1}$(約減產 5%)。由此可見，就溫度及 CO_2 濃度兩項未來氣候主要變數而言，增溫所帶來減產效應可能大於 CO_2 濃度的增產效應。

未來氣候情境之氣象預測資料，本研究使用 CGCM1、CSIRO、ECHAM4 及 HadCM2 等四種模式之預測值，代入 DSSAT 模式內以評估未來我國水稻產量改變情形。分析結果顯示，CGCM1 模式所估算數據明顯偏低，尤其在北部水稻種植有明顯減產現象，減產幅度甚至達 30% (Fig. 8)。CSIRO、ECHAM4 及 HadCM2 等三種模式結果相近，其預測結果在北部也呈減產趨勢，但在中南部水稻主要種植區則有增產現象，同時 2080 年較 2050 年更明顯。以臺灣全地之平均而言，分析結果呈減產趨勢，2020 年、2050 年及 2080 年分別減產 3.5、4.7 及 7%。

討論

氣候變遷對於地球生態影響層面廣泛且深入，其中五分之一的負面效應可能發生於農業部門(Pearce *et al.* 1996)，如何評估農業損失並研擬因應對策，尤其是糧食生產，成為當前重要課題。過去針對穀類生產的估算方式有多種方法，其一為評估土地生產力趨勢如 FAO 方法(Tan and Shibasaki 2003)，即利用土地資源及生態潛勢探討農作物生產的影響，惟複雜的農業問題無法僅由土地估算。另一為統計迴歸方式，綜合作物生產過程相關環境或人為因素加以統計分析，建立各項因素之迴歸關係式，昔日傳統農業生產評估大多採此作法。此一方式鮮少以數學或物理關係來描述生長，對氣候變遷的評估存有缺點(Jame and Cutforth 1996)，著名生長模式研究學者 Monteith (1981)即認為統計方式不適合作物一氣候之間的研究，因其忽略物理和生理機制之間的相關性。目前氣候模式是以大尺度(區域或全球尺度)為範圍，為了普遍性與廣適性，大部分參數儘可能以數學或物理方法推導。因此，農作物生長模式亦應以相同程序處理作物的生長描述及產量預測，才能在不同氣候條件下進行預測，並使氣候-作物-土壤之間維持同一單位。然作物生

長機制之數值化乃此三系統間最為複雜及困難者，多數作物生理反應並非線性且具有複雜的物種(及品種)遺傳調控。所以，部分生理反應過程仍需由試驗結果之經驗數值加以取代，尚未能完全以數學或物理方式處理(Jones *et al.* 2003)。

本研究選用之 DSSAT 模式架構，具有高比例的機制性及少部分非量化經驗值，經以農委會農業試驗所 16 年試驗實測資料驗證，顯示對於水稻定性性狀(開花及成熟日數)可獲得極佳預測結果(Table 2)。而定量性狀之實證結果(Table 2 及 Fig. 3)，地上部生質量相關係數可達 0.9，產量則介於 0.7-0.8 之間，由於實測資料不足使產量估測受限。欲提高推估準確度，除了作物生長資料外，尚需結合其他調查項目(如土壤、病蟲害及雜草等)。惟有完整資料庫，才可對農業生產環境作全面性監測，也才能針對模擬結果進行參數調整或解釋其發生原因，一如本研究 DSSAT 模式對水稻生質量低估結果之分析(Table 2)。

臺灣水稻栽培以一期作產量較高，主要原因之一在於生育日數較長可累積較多生質量，二期作生育初期的高溫加速了水稻生育階段轉換，生育後期又因低溫造成穀粒充實不足而影響最終產量。作物的發育受到溫度影響，DSSAT 模式以積算溫度(growth degree day; GDD)預測水稻每一生育階段所需日數，包括幼苗終期、始穗期、抽穗期、穀粒充實期及成熟期等皆依此估算。又在降溫及升溫的敏感度分析中，清楚瞭解溫度對於成熟日數的推估，以及對產量的間接影響，如二期稻作的增溫隨縮短成熟日數卻減少產量(Fig. 4)。本研究二期稻作 16 年平均之最高溫達到 31.49℃ (Table 1)，模擬增溫 5℃(即 36.49℃)將對水稻生長造成傷害，因 Al-Khatib and Paulsen (1999)的作物生理研究指出稻株在溫度超過 32℃後光合作用速率將下降。高溫也影響花粉授粉及最終產量，Matsui *et al.* (2007)的研究發現當溫度至 34.5℃時水稻將發生授粉障礙。雖然 DSSAT 模式尚無高溫對授粉的影響評估功能，但隨著高溫(或稱熱浪)發生頻率越來越高，花器授粉又對產量具有決定性影響，將來應會有更多的探討。

本研究之溫度敏感性分析是將最高及最低溫同時加減每一溫度梯度進行，其實溫差對水稻產量也有影響，日較溫(最高溫及最低溫的差值)在過去歷史資料中顯示有下降趨勢(Vose *et al.* 2005)，而在臺灣也有相同變化趨勢(Yao *et al.* 1999)。由氣候模式的預測，未來日較溫變化將更明顯(Stone and Weaver 2003)。日較溫下降對於水稻產量有正相關及負相關不同結論(Peng *et al.* 2004, Lobell 2007)，主要在於不同溫度範圍影響呼吸作用、蒸發散量、穀粒充實速率甚至於病蟲害發生等，仍需更多試驗數據來獲得較明確之結論。

日射量影響葉片固碳生理反應及生質量累積，由過去資料分析結果，日射量和生質量累積有極高相關性，兩者在一期作之相關性達 0.95 以上，二期作較低約 0.90 (Chen *et al.* 2009)。因此，當日射量增強則水稻生質量累積也增加，本研究之一、二期作所模擬結果皆相同(Fig. 5)。水稻生質量累積決定於截取光能的面積及葉片自身固碳的能力，兩者的比值稱為比葉面積，Lambers and Poorter (1992)指出比葉面積是評估作物生長速率及光合作用的重要指標。基本上，高光增加葉片厚度是因葉肉(mesophyll)體積增加，會有較高葉片同化速率；相對的，比葉面積數值越高則代表同化速率越低，即比葉面積與日射量呈反比(Yao *et al.* 2007b)。本研究顯示升高日射量在一期稻作增產效果較明顯，主要原因可能為二期稻作日射量原已較高，可能已接近光飽和點，故增加日射量對於葉片生理反應的效果較不明顯。

至於未來氣候變遷下日射量之變化情形，依據 GCM 模式預估太陽輻射量增加或減少的結論皆有(Brown and Rosenberg 1997)，由於日射量受雲層及水汽循環影響，

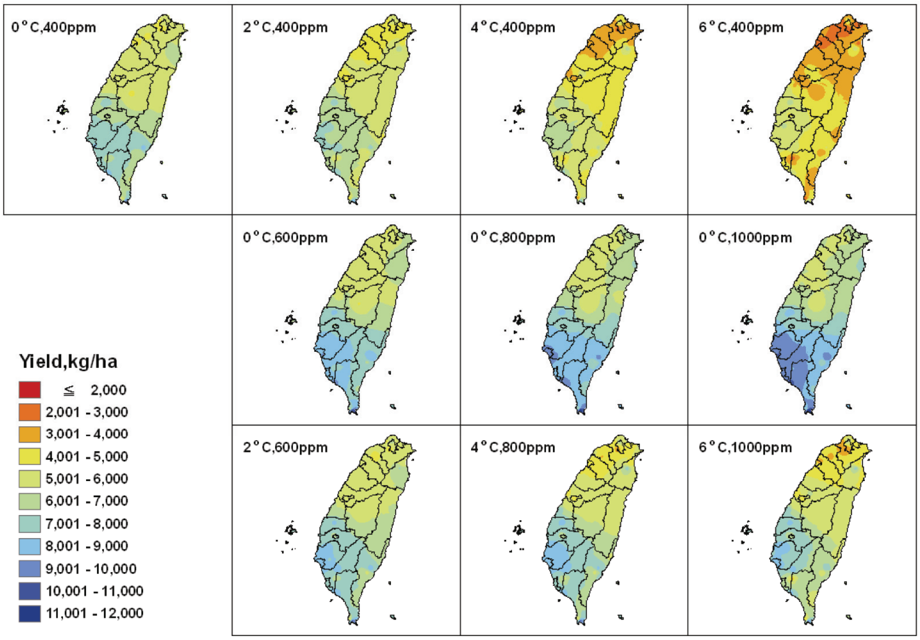

Fig. 7. The sensitivity analysis for the grain yield of rice under the conditions of increasing temperature and CO_2 concentration by the DSSAT model in Taiwan area.

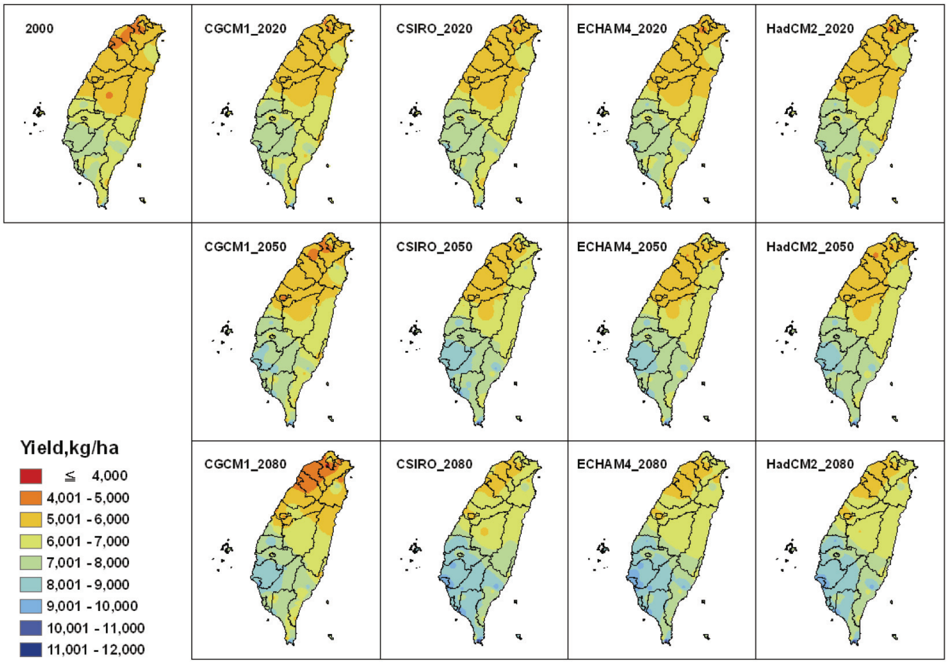

Fig. 8. The prediction of grain yields of rice by the DSSAT model with climatic factors resulted from four different GCM models in Taiwan area at 2020, 2050 and 2080, respectively.

變異係數極大(Table 1)，長期預測的意義不高。Jong *et al.* (1982)研究指出夏威夷所種植玉米可由日射量解釋 78.5%產量的變異，仍說明了日射量變化是作物生理反應的主要變異來源。另以區域或全國性產量預測角度而言，國內現行的日射量資料在觀測點數及地域分佈並不足夠，雖然氣象資料可分由中央氣象局直屬測站、農業試驗單位測站、自動測站及民用測站等四種來源取得，未來仍有擴增空間。以 2002 年為例，全國共有 1,117 個氣象站分佈於各地，就設站密度而言是相當密集，但能提供作物模式含有日射量之測站僅 67 個，扣除高山及離島，分布在農業區的測站則寥寥可數。因此，在增進區域氣象預測能力及產量預估準確性的前提下，具有日射量觀測項目之氣象測站不足將是一大隱憂。

提高大氣二氧化碳濃度將使光合作用速率增加，主要係細胞內 CO_2 濃度增加、羧化(carboxylation)效率提高及減少光呼吸(photorespiration)等原因(Centritto *et al.* 2002)。因此，提供高二氧化碳環境可使水稻輻射利用效率明顯提高，不論在營養期或生殖期皆有一致反應趨勢(Bannayan *et al.* 2005)，而本研究在一、二期稻作也有相同結果(Fig. 6)。本研究亦顯示另當葉片處於高 CO_2 濃度下，氣孔會因高 CO_2 刺激而使導度降低，因此葉片蒸散強度將因部分氣孔關閉而減少，此現象將有助於改善水分利用效率，如 Yao *et al.* (2007a)之試驗結果。

Mall and Aggarwal (2002)認為氣候變遷對水稻產量直接影響因素為溫度及二氧化碳濃度，間接因素包括灌溉利用率、蟲害競爭、土壤肥力改變和土壤沖蝕等。因此本研究探討未來氣候以溫度及二氧化碳濃度為主，由兩項氣象因素敏感度分析結果，顯示增溫對於產量的影響大於 CO_2 所帶來之肥料效應(Fig. 7)。雖然日射量在氣候預測上仍有困難，且有強烈地域特性，未來究竟是增加或減少難有定論(IPCC 2001)，但是日射量對作物生長的影響力仍不應忽視。此三種主要氣象因子的不同組合分析結果，發現在最差組合設定可使水稻之生質量及產量減少 70-80% (Table 3)。因此，就本研究敏感度分析所設定之範圍，在溫度升高、日射量下降及 CO_2 濃度維持不變條件下，水稻將明顯減產。

本研究將 DSSAT 模式結合地理資訊系統，針對氣候敏感度分析及未來產量預測進行研究(Fig. 7 及 Fig. 8)，將有助於未來我國水稻生產地區空間分析，以作為整體農業生產預測、適栽區規劃或災害補助之參考，此一方式亦適用於氣候變遷對水稻生產的研究(Masutomi *et al.* 2009)。針對氣候變遷影響的評估，未來氣候情境的設定會左右模擬結果，目前大氣環流模式(GCM)固然可以有效模擬全球氣候變化大尺度的平均特徵，惟因每一格網解析度過低，對於區域性氣候特徵的模擬結果並不理想。臺灣的面積狹小且地貌複雜，前項網格所涵蓋區域遠大於臺灣全地(Fig. 2)，因此在使用此資料時必須先進行降尺度(downscaling)研究，來彌補大氣環流模式之不足。本研究所使用之 GCM 預測值，係以內插法選擇四種可提供作物模式所需氣象資料之大氣環流模式預估值，以鄰近臺灣之格網資料利用反距離加權差值法(inverse distance to a power)後，取得臺灣 40 個氣象測站之內插值。文獻中關於氣象資料運用於時間及空間尺度差異比較者並不多見，僅 Jolly *et al.* (2005)曾比較 truncated Gaussian filter、克里金差值法、反距離加權插值法等三種地理統計方法對氣象資料的估算，三種估算方法獲得之氣象變數十分近似。

本研究利用四種大氣環流模式所做之未來氣候資料對水稻產量影響評估結果，以 CGCM1 模式得到之產量最低(Fig. 8)，其餘三種模式的結果有一致趨勢，究其原因在於 CGCM1 模式所估算的最高溫較高於其他模式，導致出現甚多高於 40℃以上之天數，尤其是 2080 年之預測值。由於造成高溫估算值偏高之原因並不清楚，本研究主要依據其餘

三種分析結果進行討論。綜合言之，北部地區將減產，中南部地區則將增產，而增產原因除了提高 CO_2 肥料效應之外，一期作之生育初期將會因為增溫而加速稻株生長，生育後期之高溫則不至於縮短生育期，因此促成產量增加。臺灣全地整體平均呈減產趨勢，2020 年減產 3.5%，2050 年減產升至 4.7%，2080 年減產多達 7%。惟中部地區之預估產量則增加，利用 CSIRO、ECHAM4 及 HadCM2 等三種模式所得結果為均為增產 1%，近似於 Yao *et al.* (2000)以 GISS、UKMO 及 GFDL 等三種模式預估中部地區在 2050 年 2 倍 CO_2 濃度增產 2-4%的結果。北部地區種植的水稻未來卻面臨減產威脅，若加上水資源調配上的限制，將可能遭致更大減產問題。另依據 Tung (1997)以大甲溪為例的研究發現，在二倍 CO_2 之氣候情景下我國雨量增加 4%，豐水期增加至 7%，枯水期卻減少 3%。由此可知，未來降雨將呈極端化，在豐水期(夏季)時雨量增多、逕流增大，對農作物可能造成淹水傷害，而枯水期(冬季)則降雨日數減少，若逢溫度升高加速蒸發散量，則將使水資源供應更形緊縮。如此一來，北部一稻期作所需灌溉用水將可能因為冬季缺水而受到排擠。中南部雖有小幅度增產，但增幅並不顯著。事實上，未來氣候所造成的問題非常複雜，亦無法準確預測，吾人可從氣候新情境對農作物生產的影響趨勢加以探討，並以研擬因應策略。

結論

目前國際社會已意識到氣候變遷對於全球生態及糧食安全的衝擊，1997 年在日本所簽訂之『京都議定書』即是希望透過國際力量以經濟制裁手段，使世界各國正視氣候變遷的威脅，積極的減緩氣候暖化的速度。而未來氣候對水稻生產的影響，必須注意氣候的快速改變且難以精確預測，然而農耕制度改變或新品種育成則需要長時間投入，因此利用作物模式進行作物對氣候變化反應的評估，有助於提前找出未來可能發生問題的解決方案。本研究以 DSSAT 模式驗證、氣候敏感度分析及未來氣候衝擊下水稻產量評估之系列探討，顯示我國水稻產量將朝向減產趨勢發展，而敏感度分析結果可知增溫對於水稻減產效應大於提高 CO_2 濃度之增產效應。分析也發現日射量測站不足將影響氣候-作物模式在空間上之評估能力，尤其是農業生產區。而作物模式雖能對作物產量的評估具有高度攜帶性，適用不同區域或氣象條件之評估，但對於極端氣象事件對作物生長影響的評估能力仍顯不足，仍有很大改進空間。有鑑於此，未來應該努力謀求解決目前模式評估上的缺點與限制，並致力於建立完整的作物-氣候資料庫，才能有效提升氣候預測能力的進步，為農作生產與糧食安全規劃作出更大貢獻。

誌謝

本研究所使用之水稻田間實測值來自於農委會農業試驗所水稻豐歉試驗資料，特別要對蔡金川博士、漆匡時先生和農業工程組農業氣象研究室同仁長期試驗調查，表示由衷謝忱。

引用文獻

Al-Khatib K, GM Paulsen (1999) High-temperature effects on photosynthetic processes in temperate and tropical cereals. **Crop Sci.** 39:119-125.

Bannayan M, K Kobayashi, HY Kim, M Lieffering, M Okada, S Miura (2005) Modeling the interactive effects of atmospheric CO_2 and N on rice growth and yield. **Field Crops Res.** 93: 237-251.

Brown RA, NJ Rosenberg (1997) Sensitivity of crop yield and water use to change in a range of climatic factors and CO_2 concentration: a simulation study applying EPIC to the central USA. **Agric. For. Meteorol.** 83:171-203.

Centritto M, ME Lucas, PG Jarvis (2002) Gas exchange, biomass, whole-plant water-use

efficiency and water uptake of peach (*Prunus persica*) seedling in response to elevated carbon dioxide concentration and water availability. **Tree Physiol.** 22:699-706.

Chen C, MH Yao, SH Chen (2009) Study of radiation use efficiency in rice. (in Chinese with English abstract) **J. Agric. Assoc. Taiwan.** 10:86-101.

Chen CL, CF Lin, TS Liu (1994) Estimate and analysis of solar radiations in Taiwan. (in Chinese with English abstract) **J. Taiwan Agric. Res.** 43:77-92.

IPCC (2001) Climate Change 2001. The Scientific Basis. Cambridge University Press. New York, USA. 1032pp.

Jame Y, H Cutforth (1996) Crop growth models for decision support systems. **Can. J. Plant Sci.** 76:9-19.

Jolly WM, JM Graham, A Michaelis, R Nemani, SW Running (2005) A flexible, integrated system for generating meteorological surfaces derived from point sources across multiple geographic scales. **Environ. Model Software** 20:873-882.

Jones JW, GG Hoogenboom, CH Porter, KJ Boote, WD Batchelor, LA Hunt, PW Wilkens, U Singh, AJ Gijsman, JT Ritchie (2003) The DSSAT cropping system model. **Eur. J. Agron.** 18:235-265.

Jong SK, JL Brewbaker, CH Lee (1982) Effects of solar radiation on the performance of maize in 41 successive monthly plantings in Hawaii. **Crop Sci.** 22:13-18.

Lambers H, H Poorter (1992) Inherent variation in growth rate between higher plants: A search for physiological causes and ecological consequence. **Adv. Ecol. Res**. 22:187-261.

Li CS (2000) Modeling trace gas emissions from agricultural ecosystems. **Nutr. Cycl. Agroecosyst.** 58: 259-276.

Lobell DB (2007) Change in diurnal temperature ranges and national cereal yields. **Agric. For. Meteorol.** 145:229-238.

Mall RK, PK Aggarwal (2002) Climate change and rice yields in diverse agro-environment of India. Effects of uncertainties in scenarios and crop models on impact assessment. **Climatic Change** 52:331-343.

Manderscheid R, S Burkart, B Bramm, W Hans-Joachim (2003) Effect of CO_2 enrichment on growth and daily radiation use efficiency of wheat in relation to temperature and growth stage. **Eur. J. Agron.** 19:411-425.

Masutomi Y, K Takahashi, H Harasawa, Y Matsuoka (2009) Impact assessment of climate change on rice production in Asia in comprehensive consideration of process/ parameter uncertainty in general circulation models. **Agric. Ecol. Environ.** 131: 281-291.

Matsui T, K Kobayasi, M Yoshimoto, T Hasegawa (2007) Stability of rice pollination in the field under hot and dry conditions in the Riverina of New South Wales, Australia. **Plant Prod. Sci.** 10:57-63.

Monteith JL (1981) Climatic variation and growth of crop. **Q.J.R. Meteorol. Sci.** 107:749-774.

Parton WJ (1996) The CENTURY model. p.283-293. *In*: **Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing Long-term Datasets**. DS Powlson, P Smith, JU Smith (eds.) NATO ASI series I. Colorado State University, USA.

Peng S, J Huang, J Sheehy, J Laza, R Visperas, X Zhong, G Centeno, G Khush, K Cassman (2004) Rice yield decline with higher night temperature from global warming. **Proc. Natl. Acad. Sci.** 101:9971-9975.

Sinclair TR, RC Muchow (1999) Radiation use efficiency. **Adv. Agron.** 65:215-265.

Stone D, A Weaver (2003) Factors contributing to diurnal temperature range trends in twentieth and twenty-first century simulations of the CCCma couple model. **Climate Dynam.** 20: 435-445.

Tan G, R Shibasaki (2003) Global estimation of crop productivity and the impact of global warming by GIS and EPIC integration. **Ecol. Model** 168:357-370.

Tesfaya K, S Walker, M Tsubo (2006) Radiation interception and radiation use efficiency of three grain legumes under water deficit condition in a semi-arid environment. **Eur. J. Agron.** 25:60-70.

Tsvetsinskaya EA, LO Mearns, T Mavromatis, W Gao, L McDaniel, MW Downton (2003) The effect of spatial scale of climatic change scenarios on simulated maize, winter wheat, and rice production in the southeastern United States. **Climatic Change** 60:37-71.

Tung CP (1997) The impacts of climate change on Dai-Chia creek upstream flows. (in Chinese with English abstract) **Taiwan Water Conserv.** 45:64-70。

Vose RS, DR Easterling, B Gleason (2005) Maximum and minimum temperature trends for the globe: an update through 2004. **Geophy. Res. Lett.** 32, L23822.

Yao MH, SH Chen, S Chen (2007a) Studies on the meteorological resources use efficiency of rice for climate change. (in Chinese with English abstract) **J. Taiwan Agric. Res.** 56:31-44.

Yao MH, SH Chen, S Chen (2007b) Use of chlorophyll fluorescence for estimating leaf photosynthesis of crops. (in Chinese with English abstract) **J. Taiwan Agric. Res.** 56:224-236.

Yao MH, HS Lur, C Chu (1999) Analysis of diurnal temperature range in Taiwan. (in Chinese with English abstract) **J. Agric. Assoc. China** 188:32-46.

Yao MH, HS Lur, C Chu, JC Tsai (2000) The applicability of DSSAT model to predict the production of rice and to evaluate the impact of climate change. (in Chinese with English abstract) **J. Taiwan Agric. Res.** 49:16-28.

－編輯：楊純明